

许建民, 刘艳, 颜志明, 等. 不同光谱对马铃薯种薯品质的影响[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(5): 1105-1111.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2020.05.005

不同光谱对马铃薯种薯品质的影响

许建民^{1,2}, 刘艳¹, 颜志明^{1,2}, 仇学文¹

(1. 江苏农林职业技术学院, 江苏 句容 212400; 2. 江苏现代园艺工程技术中心, 江苏 句容 212400)

摘要: 以马铃薯品种转心乌为试验材料, 研究纯蓝、蓝红1:3、蓝红1:5、蓝红1:7和纯红光5种不同光谱对马铃薯种薯生产及品质的影响。结果表明, 与蓝光处理相比, 红光处理可以有效增加马铃薯株高、茎粗、单株块茎鲜质量及块茎中可溶性蛋白质和花青素含量; 纯蓝光处理的块茎可溶性糖、游离氨基酸、抗坏血酸和类胡萝卜素含量显著高于纯红光处理; 纯蓝光处理的钙、铁和锌含量高于纯红光处理, 纯红光处理的钾和镁含量高于纯蓝光处理; 蓝红1:7处理下单株结薯数和产量在所有处理中最高, 蓝红1:5复合光谱处理的支链淀粉、直链淀粉和总淀粉含量, 可溶性蛋白质、钾、铁、镁含量在所有处理中最高。在马铃薯种薯生产中选用蓝红1:7的复合光谱可以增加马铃薯种薯产量, 选用蓝红1:5的复合光谱可以提高马铃薯种薯淀粉含量等品质。

关键词: 马铃薯; 光谱; 种薯; 品质

中图分类号: S532.048 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2020)05-1105-07

Effects of different spectra on quality of seed potato

XU Jian-min^{1,2}, LIU Yan¹, YAN Zhi-ming^{1,2}, QIU Xue-wen¹

(1. Jiangsu Vocational College of Agriculture and Forestry, Jurong 212400, China; 2. Engineering and Technical Center for Modern Horticulture, Jurong 212400, China)

Abstract: In this study Zhuanxinwu potato was used as the test material to study the effects of five different spectra of blue, blue-red 1:3, blue-red 1:5, blue-red 1:7 and red on production and quality of seed potato. The results showed that compared with blue light treatment, red light treatment could effectively increase potato plant height, stem thickness, fresh weight of tubers per plant and contents of soluble protein and anthocyanins in the tubers. The contents of soluble sugar, free amino acids, ascorbic acid and carotenoid in the tubers under blue light treatment were significantly higher than those under red light treatment. The contents of Ca, Fe and Zn under blue light treatment were higher than those under red light treatment, and K and Mg contents under red light treatment were higher than those under blue light treatment. In all treatments, the number of tubers per plant and yield were the highest under blue-red 1:7 treatment. The contents of amylopectin, amylose, total starch, soluble protein, K, Fe and Mg were highest under the blue-red 1:5 treatment. In the production of seed potato, the composite spectrum of blue-red 1:7 can increase the yield of seed potato, and the composite spectrum of blue-red 1:5 can increase the quality of seed potato.

Key words: potato; spectra; seed potato; quality

收稿日期: 2020-02-06

基金项目: 江苏农林职业技术学院院级课题(2016kj002); 江苏高校“青蓝工程”项目

作者简介: 许建民(1981-), 男, 甘肃张掖人, 硕士, 副教授, 主要从事设施园艺光环境控制研究。(E-mail) jsnlxjm@vip.163.com

马铃薯属茄科茄属, 是世界第4大粮食作物^[1], 传统的繁殖方式主要依靠块茎自留种, 长期使用自留种会因病毒侵染而引起产量降低和品种退化。使用脱毒种薯可以有效解决以上问题, 因此脱毒种薯生产在马铃薯产业发展中至关重要。脱毒种薯的生

产主要包括茎尖脱毒、脱毒苗扩繁和种薯生产3个阶段。光环境会显著影响植物的生长及发育,尤其是光谱成分的变化^[2]。目前光谱对种薯生产影响的研究主要集中在脱毒组培育苗阶段,光谱显著影响马铃薯组培苗的生长^[3],远红光和红光会促进组培苗的生长和腋芽的发生^[4],蓝光会抑制组培苗的增高,但会增加叶片厚度^[5],合适的复合光比单色光更有利于马铃薯组培苗的生长^[6-7]。马铃薯种薯的生产主要通过试管薯和脱毒组培苗在防蚜网室中生产2种方式,组培苗在网室中的生产又可以根据基质的不同而分为雾培和基质培2种。徐志刚等^[8]发现,光谱通过调节马铃薯组培苗的形态发生和酶活性变化来影响碳氮化合物的合成、运输和转化,进而影响试管薯的生长。水培条件下单色蓝光和红光对种薯生长有胁迫作用,红蓝复合光(5:1)有利于块茎形成和膨大,且微型薯产量和成薯率最高^[9]。目前缺乏基质栽培条件下光谱对马铃薯种薯生产影响的研究。

紫色马铃薯转心乌是马铃薯的变种,含有丰富的花青素^[10],是比普通马铃薯更具发展潜力的纯天然营养保健食品。本试验主要研究红光、蓝光及不同比例红蓝光谱组合对马铃薯种薯生产的影响,以期马铃薯种薯生产中的光源选择提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计与方法

马铃薯品种为转心乌,由江苏农林职业技术学院组培室提供。试验在江苏农林职业技术学院人工气候室内进行,将马铃薯组培苗扦插在基质为纯蛭石的营养钵(营养钵直径11.5 cm,高12.5 cm)中。设置5个光处理,分别为波长(455±10) nm的纯蓝光(B)、波长(660±10) nm的纯红光(R)、蓝红1:3(B1R3)、蓝红1:5(B1R5)和蓝红1:7(B1R7),每个处理小区30盆。定植20 d后,每隔2 d喷施2% KH₂PO₄溶液1次。环境湿度控制在70%±10%,白天温度为(25±2)℃,夜间温度为(15±2)℃。前30 d光/暗周期为16 h/8 h,后60 d光/暗周期为8 h/16 h。使用杭州远方(EVERFINE)光谱彩色照度计(SPIC-200A)测定光谱,光照度设置为400 μmol/(m²·s)。

1.2 测定方法

农艺性状按常规方法测定,统计1 g以上的单株

结薯情况;用双波长法测定直链淀粉和支链淀粉含量^[11],淀粉总量为支链淀粉和直链淀粉含量之和;用蒽酮比色法测定可溶性糖含量,用茚三酮指示法测定游离氨基酸含量,用考马斯亮蓝法测定可溶性蛋白质含量^[12];抗坏血酸含量测定参照曹建康等^[13]的方法;丙酮石油醚浸提后用比色法测定胡萝卜素含量^[14];花青素含量测定采用pH示差法^[15]。干样用硝酸-双氧水消解后用电感耦合等离子体原子发射光谱(ICP-AES)测定钾、镁、铁、锌、钙等含量。

1.3 数据处理

数据处理分析采用SPSS 22.0软件,进行一维方差分析(ANOVA),采用Duncan's法分析差异显著性($P < 0.05$ 表示差异显著)。

2 结果与分析

2.1 不同光谱对马铃薯种薯生长的影响

由表1可见,光谱成分的变化对马铃薯收获时农艺性状的影响显著。株高随着光谱组合中红光比例的增加而增加,R处理下株高最高,B处理下株高最低,最高株高与最低株高间差异显著。R处理的茎粗同样也大于B处理,复合光处理中茎粗同样随着红光比例的增加而增加,而且B1R7处理的茎粗大于R和B处理的茎粗,可见合适的复合光有利于茎粗的增加。单株结薯数和单株块茎鲜质量是表征马铃薯田间产量的重要指标,单株块茎鲜质量在B1R7处理下最高,与R和B处理差异显著,R处理单株块茎鲜质量大于B处理,随着复合光处理中红光比例的增加,单株块茎鲜质量也相应增加;单株结薯数以B1R7处理最高,达3.33个,B处理高于R处理,但几种处理间(除B1R7处理)无显著差异;种薯平均鲜质量以B1R5处理最高,但与B1K3、B1R7处理无显著差异,B1R3处理、B1R7处理与B处理之间无显著差异,没有随着光谱中单色光比例的变化而显著变化。

2.2 不同光谱对马铃薯种薯淀粉含量的影响

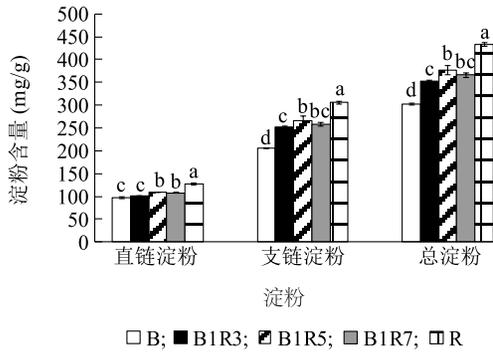
部分光谱处理间马铃薯种薯中直链淀粉、支链淀粉及总淀粉含量差异显著(图1)。纯红光处理下直链淀粉、支链淀粉和总淀粉含量都最高,红蓝组合光谱处理中以红蓝5:1处理的淀粉含量最高。5种光谱处理下直链淀粉、支链淀粉和总淀粉含量变化规律都是R>B1R5>B1R7>B1R3>B。在不同光谱处理下,马铃薯种薯中支链淀粉含量均大于直链淀粉含量。

表 1 不同光谱对马铃薯收获时农艺性状的影响

Table 1 Effects of different spectra on agronomic traits of potato at harvest

处理	株高 (cm)	茎粗 (mm)	单株结薯数 (个)	单株块茎鲜质量 (g)	种薯平均鲜质量 (g)
B	18.35±1.00c	2.96±0.22b	1.67±0.22b	9.47±0.44c	7.78±1.39b
B1R3	20.09±0.32c	2.61±0.13c	1.00±0.00b	9.30±0.25c	9.30±0.25ab
B1R5	34.46±2.66b	2.94±0.15b	1.33±0.22b	21.26±2.25b	17.54±4.33a
B1R7	39.00±0.32b	3.56±0.06a	3.33±0.89a	28.03±2.17a	9.53±2.83ab
R	54.29±2.06a	3.38±0.10a	1.30±0.22b	16.98±0.08b	14.16±2.84ab

B:纯蓝光;R:纯红光;B1R3:蓝红1:3;B1R5:蓝红1:5;B1R7:蓝红1:7。同一列数据后不同小写字母代表差异显著($P<0.05$)。



各处理见表 1 注。同一淀粉类别不同小写字母代表处理间差异显著($P<0.05$)。

图 1 不同光谱对马铃薯种薯淀粉含量的影响

Fig.1 Effects of different spectra on starch content of seed potato

2.3 不同光谱对马铃薯种薯碳氮代谢产物含量的影响

光谱对马铃薯种薯中可溶性糖、可溶性蛋白质、游离氨基酸含量的影响显著(表 2)。可溶性糖含量在 B1R3 处理下最高, B1R7 处理下最低;可溶性蛋白质含量在 B1R5 处理下最高, B1R3 处理下最低;游离氨基酸含量在纯蓝光处理下最高, B1R7 处理下最低。

表 2 不同光谱对马铃薯种薯碳氮代谢产物含量的影响

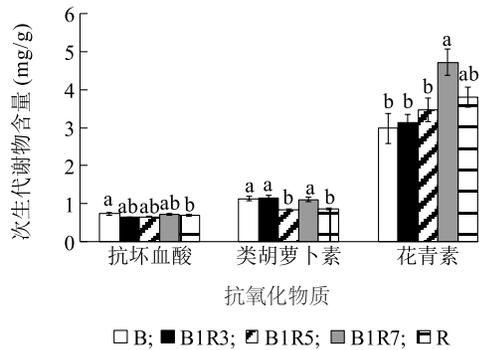
Table 2 Effects of different spectra on metabolites of carbon and nitrogen in seed potato

处理	可溶性糖含量 (mg/g)	可溶性蛋白质含量 (mg/g)	游离氨基酸含量 (mg/g)
B	156.10±0.61b	10.87±0.57a	6.66±0.20a
B1R3	175.97±0.70a	6.92±0.44b	5.66±0.12b
B1R5	153.73±3.09b	12.08±0.39a	5.75±0.01b
B1R7	134.88±1.01c	11.61±0.42a	5.49±0.10c
R	138.90±0.97c	11.47±0.39a	5.68±0.13b

各处理见表 1 注。同一列数据后不同小写字母代表差异显著($P<0.05$)。

2.4 不同光谱对马铃薯种薯抗氧化物质含量的影响

不同光谱处理后马铃薯种薯中抗坏血酸、类胡萝卜素和花青素含量存在显著差异(图 2)。纯蓝光处理的抗坏血酸含量显著高于纯红光处理,复合光处理的抗坏血酸含量之间无显著差异;纯蓝光处理的类胡萝卜素含量高于纯红光处理,复合光处理中 B1R3 处理的类胡萝卜素含量较高, B1R7 处理次之, B1R5 处理最低;纯红光处理的花青素含量高于纯蓝光处理,复合光处理下花青素含量随着红光比例的增加而增加,但 B1R3 处理与 B1R5 处理间无显著差异, B1R7 处理下的花青素含量在 5 种处理中最高。



各处理见表 1 注。同一抗氧化物质上不同小写字母代表处理间差异显著($P<0.05$)。

图 2 不同光谱对马铃薯种薯中抗氧化物质含量的影响

Fig.2 Effects of different spectra on secondary metabolite content of seed potato

2.5 不同光谱对马铃薯种薯矿质元素含量的影响

不同光谱处理对马铃薯种薯中矿质元素含量的影响显著(表 3)。钾含量在 B1R5 处理下最高,纯红光处理显著高于纯蓝光处理,复合光处理间无明显规律;纯蓝光处理的钙含量最高, B1R5 次之,其

余3种光谱处理之间无显著差异;B、B1R5和B1R7处理的铁含量无显著差异,但显著高于B1R3和R处理;B1R5和R处理的镁含量无显著差异,但显著

高于B1R7、B1R3和B处理,B处理的镁含量最低;B1R7处理的锌含量最高,各处理的锌含量排序为B1R7>B1R5>B>R>B1R3,各处理间无明显规律。

表3 不同光谱对马铃薯种薯块茎矿质元素含量的影响

Table 3 Effects of different spectra on mineral elements in seed potato tuber

处理	钾含量 (mg/g)	钙含量 (mg/g)	铁含量 (mg/g)	镁含量 (mg/g)	锌含量 (μg/g)
B	18.86±0.81d	1.41±0.06a	0.16±0.01a	0.89±0.04c	10.58±0.27c
B1R3	20.86±0.49c	1.05±0.06c	0.14±0.00b	0.93±0.04bc	8.87±0.12e
B1R5	25.30±0.42a	1.27±0.01b	0.17±0.00a	1.10±0.02a	11.54±0.26b
B1R7	23.75±0.19b	1.06±0.07c	0.16±0.01a	1.02±0.02b	12.39±0.72a
R	23.73±0.15b	1.07±0.06c	0.14±0.01b	1.08±0.02a	9.84±0.32d

各处理见表1注。同一列数据后不同字母代表差异显著($P \leq 0.05$)。

3 讨论

3.1 不同光谱对马铃薯生长的影响

光作为植物生长发育中的重要因子贯穿于植物整个生命周期,弱光可以调节植物形态的建成,强光可以影响植物的生长发育,光谱对植物生长的影响最为复杂,可见光波长范围广,影响植物生长的方方面面。本试验中,R处理下株高最高,B处理下株高最低,与Liu等^[16]和曹刚^[17]的研究结果基本一致。红光可以促进茎的伸长,主要是由于红光可以提高植株中吲哚乙酸含量,从而促进株高的增加。单株结薯数和块茎质量是决定种薯产量的重要指标,种薯大小会影响实际大田产量,一般情况下种薯大小与产量成正比,过大的种薯增产效果反而不明显^[18-19],作为原原种扩繁原种时一般推荐5g左右为宜^[20],过小的种薯贮存的养分不足以提供其休眠和发芽期间的养分,且生长周期较长,容易受环境胁迫^[21]。本试验中B1R5处理下种薯平均鲜质量最高,但单株结薯数较少;B1R7处理的单株结薯数较多,种薯平均鲜质量在9g左右,比较符合原原种的推荐指标。综合单株结薯数和种薯平均鲜质量2个指标,B1R7处理有利于提高马铃薯种薯的产量。唐道彬等^[9]的马铃薯雾培试验结果显示,蓝光会引起叶片早衰,B1R5有利于种薯生长,与本试验结果略有差异,主要是由于品种的不同,转心乌是高山品种,叶片中富含花青素,花青素可以有效缓解环境胁迫^[22]。

3.2 不同光谱对马铃薯碳氮代谢产物含量的影响

淀粉等糖类化合物和蛋白质是种子储藏的主要

物质,这些物质在种子发芽时会被分解为小分子化合物并运输到胚芽中利用。马铃薯种薯虽然不是植物学上的种子,但仍需要淀粉等化合物在发芽过程中和叶片未具备光合能力之前为植株生长提供养分。马铃薯淀粉主要由直链淀粉和支链淀粉组成,支链淀粉的含量高于直链淀粉,不同光谱处理没有改变此比例,但对2种淀粉的含量存在显著影响。马铃薯淀粉合成和积累与关键酶活性有关。马铃薯块茎中淀粉结构与ADP-glucose焦磷酸化酶有关^[23]。彭波等^[24]的研究结果显示,直链淀粉含量与淀粉合成酶(GBSS)活性呈正相关关系,与可溶性淀粉合成酶(SSS)和淀粉分支酶(SBE)活性变化呈相反趋势。本研究中纯红光处理下支链淀粉含量、直链淀粉含量和淀粉总含量均高于其他处理。可能与红光影响GBSS、SSS和SBE活性有关,也可能与马铃薯生长过程中淀粉的合成和转运有关,需要进一步研究。

种子发芽时,蛋白质会在蛋白酶的作用下分解成游离氨基酸,然后以酰胺的形式运输到胚轴供植物生长使用,因此蛋白质和氨基酸含量是马铃薯种薯品质的影响因子之一。在对番茄^[25]、萝卜芽苗菜^[26]、香椿芽苗菜^[27]等多种蔬菜的研究中发现,红光有利于可溶性糖含量增加。Li等^[28]研究发现,红光可以促进植物碳水化合物的代谢,提高碳水化合物含量。碳氮化合物的积累可能受到蓝光感受器的控制,而这种途径与光合作用无关^[29]。但本试验中,纯红光处理的马铃薯块茎中可溶性蛋白质含量高于纯蓝光处理,纯蓝光处理可溶性糖和游离氨基

酸含量高于纯红光处理,与前人研究结果不一致。前人的研究对象主要集中在叶片,叶片既是光合作用的源又是库,光合作用过程中不涉及光合产物的长距离输送,而本研究对象是块茎,光合产物从叶片合成到块茎储存还涉及转运,光质除了影响光合产物的合成外,可能还影响光合产物的转运。

3.3 不同光谱对马铃薯种薯抗氧化物质含量的影响

光在许多抗氧化剂如维生素 C、类胡萝卜素和花青素的合成中起着重要的作用。抗氧化物质有助于马铃薯度过贮藏期的不利环境。用蓝光处理转色期的番茄果实可以增加抗坏血酸含量^[30]。本试验中,在纯蓝光处理下马铃薯块茎维生素 C 含量最高,几种组合光质处理次之,红光处理最低,与前人研究结果一致。秦爱国等^[31]认为马铃薯中抗坏血酸积累的水平取决于半乳糖内酯脱氢酶(*GalLDH*)和脱氢抗坏血酸还原酶(*DHAR*)的活性,但目前还没有关于光质对这 2 种酶活性影响的研究报道。

花青素可以提高植物的抗冻、抗旱和抗氧化能力,因此有助于马铃薯种薯的贮藏^[22]。蓝光是调控番茄花青素合成的有效光质,补充蓝光可以增加生菜叶片中的花青素含量^[32-33]。单色蓝光可增加查尔酮合酶(*CHS*)活性和促进二氢黄酮醇还原酶(*DFR*)基因的表达^[34]。Ensminger 等^[35]报道,蓝光能促进欧芹等植物细胞质苯丙氨酸解氨酶(*PAL*)的活性,红光则具有抑制作用。本试验中 B1R7 处理下花青素含量最高,单色光和另外几种光质组合处理间无显著差异,与前人结果不同。这可能是因为光质除影响花青素的合成外,还影响花青素的汇集与贮存,花青素的运输和积累也会影响马铃薯块茎中花青素的含量。

类胡萝卜素是多种天然色素的总称,常见的有 β -胡萝卜素、玉米黄素、番茄红素和叶黄素等^[36-38]。Lefsrud 等^[39]发现,蓝光可以增加蔬菜中类胡萝卜素含量;蓝光处理的不结球白菜中类胡萝卜素含量高于红蓝光及纯红光处理^[40];Alba 等^[41]发现,红光可以增加番茄果实中番茄红素含量;红光可以增加豌豆苗叶片中 β -胡萝卜素含量^[42]。本试验中 B1R3 处理的类胡萝卜素含量最高,与纯蓝光处理无显著差异,显著高于纯红光处理,证明蓝光能增加马铃薯块茎中的类胡萝卜素含量。类胡萝卜素的多样性决定了光质对其影响结果的复杂性,不同物种间类胡

萝卜素积累具有鲜明的特异性,因此红光和蓝光对类胡萝卜素含量的影响不同。

3.4 不同光谱对马铃薯种薯矿质元素含量的影响

矿质元素可以满足种薯发芽时对矿质元素的需求。本试验中,纯蓝光下的钙、铁和锌含量高于纯红光处理,纯红光处理下的钾和镁含量高于纯蓝光处理,除钙外,铁、锌、钾和镁含量在复合光处理下最大。许莉等^[43]发现,蓝光更有利于提高叶用莴苣镁、锌、铜、锰等矿质元素的含量。陈晓丽等^[44]研究发现,红光有利于水培生菜矿质元素的吸收,红蓝复合光处理下多种矿质元素的累积量达到最大值。Amoozgar 等^[45]发现,与蓝光相比,红光处理下生菜中钾、铁、锌和铜含量显著增加。Kopsell 等^[46]研究发现,蓝光处理下西兰花芽苗菜中钾、铁、锌、铜和镁含量显著高于红蓝复合光处理。光谱对蔬菜矿质元素含量的影响因种类不同而存在不同表现^[47],说明不同植物在同一光谱下矿质元素吸收和代谢的响应机制可能不同。

4 结论

光谱显著影响马铃薯种薯的生长。与蓝光处理相比,红光处理可以有效增加马铃薯株高、茎粗、单株块茎鲜质量和块茎中支链淀粉、直链淀粉、总淀粉、可溶性蛋白质和花青素含量。纯蓝光处理的可溶性糖、游离氨基酸、抗坏血酸和类胡萝卜素含量显著高于纯红光处理;纯蓝光处理的钙、铁和锌含量高于纯红光处理,纯红光处理的钾和镁含量高于纯蓝光处理。复合光谱中红光比例偏高更有利于马铃薯种薯的生长,种薯生产中最重要种薯平均鲜质量和单株结薯数 2 个指标均以 B1R7 处理最佳;而对淀粉含量、蛋白质含量等贮存指标或生理指标而言, B1R5 处理较好。可能在 B1R5 和 B1R7 2 种光谱组合中间存在一个更佳组合,需要进一步研究,可以肯定的是合适的复合光谱会比单色光更有利于马铃薯种薯生长。

参考文献:

- [1] 陈萌山,王小虎.中国马铃薯主食产业化发展与展望[J].农业经济问题,2015,36(12):4-11.
- [2] 许大全,高伟,阮军.光质对植物生长发育的影响[J].植物生理学报,2015,51(8):1217-1234.
- [3] SEABROOK J E A. Light effects on the growth and morphogenesis of potato (*Solanum tuberosum* L.) *in vitro* a review[J]. American

- Journal of Potato Research, 2005, 82(5): 353-367.
- [4] MIYASHITA Y, KITAYA Y, KOZAI T. Effects of red and far-red light on the growth and morphology of potato plantlets *in vitro* using light emitting diode as a light source for micropropagation[J]. Acta Horticulturae, 1995, 393(418): 189-194.
- [5] AKSENOVA N P, KONSTANTINOVA T N, SERGEEVA L I, et al. Morphogenesis of potato plants *in vitro* I. Effect of light quality and hormones[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 1994, 13(3): 143-146.
- [6] CHEN L L, XUE X Z, YANG Y D, et al. Effects of red and blue LEDs on *in vitro* growth and microtuberization of potato single-node cuttings[J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 2018, 5(2): 197-205.
- [7] MA X F, WANG Y P, LIU M X, et al. Effects of green and red lights on the growth and morphogenesis of potato (*Solanum tuberosum* L.) plantlets *in vitro* [J]. Scientia Horticulturae, 2015, 190: 104-109.
- [8] 徐志刚, 李瑞宁, 黄文文. 光谱与光密度影响马铃薯试管薯诱导发育的研究进展[J]. 南京农业大学学报, 2018, 41(2): 195-202.
- [9] 唐道彬, 陈永春, 张晓勇, 等. 不同光质对水培脱毒马铃薯光合与结薯特性的影响[J]. 园艺学报, 2017, 44(4): 691-702.
- [10] 赵昶灵, 郭华春, 刘福翠, 等. 马铃薯‘转心乌’块茎色素的组成和含量[J]. 西北植物学报, 2007(10): 1953-1961.
- [11] 王春霞, 孙领霞, 刘满英. 双波长分光光度法测定河北省多种粮豆作物中直、支链淀粉含量[J]. 光谱实验室, 1999, 16(3): 259-261.
- [12] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [13] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007.
- [14] HOENECKE M E, BULA R J, TIBBITTS T W. Importance of ‘blue’ photon levels for lettuce seedlings grown under red-light-emitting diodes[J]. Hort Science, 1992, 27(5): 427-430.
- [15] 刘洪海, 张晓丽, 杜平, 等. pH 示差法测定烟 73 葡萄中花青素含量[J]. 中国调味品, 2009, 34(4): 110-111, 117.
- [16] LIU M, XU Z, GUO S, et al. Evaluation of leaf morphology, structure and biochemical substance of balloon flower (*Platycodon grandiflorum* (Jacq.) A. DC.) plantlets *in vitro* under different light spectra[J]. Scientia Horticulturae, 2014, 174(1): 112-118.
- [17] 曹刚. 不同 LED 光质对黄瓜和结球甘蓝苗期生长、光合特性及内源激素的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2013.
- [18] 马众文, 胡金和, 刘宗发. 脱毒马铃薯不同大小种薯应用试验[J]. 中国马铃薯, 2002(1): 32-33.
- [19] 龙国, 张绍荣, 梅艳, 等. 马铃薯脱毒种薯大小与产量关系研究初报[J]. 种子, 2008, 27(8): 99-101.
- [20] 徐茜, 宗洪霞, 张兴端, 等. 渝马铃薯 3 号原原种薯大小对其主要性状和原种产量的影响[J]. 中国种业, 2017(10): 44-46.
- [21] STRUIK P C V. Effects of drought on the initiation, yield, and size distribution of tubers of *Solanum tuberosum* L. cv. Bintje[J]. Potato Research, 1987, 30(1): 170.
- [22] 王鸿雪, 刘天宇, 庄维兵, 等. 花青素苷在植物逆境响应中的功能研究进展[J]. 农业生物技术学报, 2020, 28(1): 174-183.
- [23] LLOYD J R, SPRINGER F, BULÉON A, et al. The influence of alterations in adp-glucose pyrophosphorylase activities on starch structure and composition in potato tubers[J]. Planta, 1999, 209(2): 230-238.
- [24] 彭波, 陈瑞, 史冬燕, 等. 云南野生稻籽粒淀粉合成关键酶活性测定[J]. 广西植物, 2008(6): 800-805, 799.
- [25] 蒲高斌, 刘世琦, 刘磊, 等. 不同光质对番茄幼苗生长和生理特性的影响[J]. 园艺学报, 2005, 32(3): 420-425.
- [26] 张立伟, 刘世琦, 张自坤, 等. 光质对萝卜芽苗菜营养品质的影响[J]. 营养学报, 2010, 32(4): 390-392, 396.
- [27] 鲁燕舞, 唐丽, 张晓燕, 等. 光质对香椿芽苗菜生长和营养品质的影响[J]. 营养学报, 2014, 36(2): 188-192.
- [28] LI H, TANG C, XU Z, et al. Effects of different light sources on the growth of non-heading chinese cabbage (*Brassica campestris* L.) [J]. Journal of Agricultural Science, 2012, 4(4): 262-273.
- [29] KORBEE N, FÉLIX L F, JOSÉ A. Effect of light quality on the accumulation of photosynthetic pigments, proteins and mycosporine-like amino acids in the red alga *Porphyra leucosticta* (Bangiales, Rhodophyta) [J]. J Photochem Photobiol B, 2005, 80(2): 71-78.
- [30] 陈强, 刘世琦, 张自坤, 等. 不同 LED 光源对番茄果实转色期品质的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(5): 156-161.
- [31] 秦爱国, 于贤昌. 马铃薯抗坏血酸含量及其代谢相关酶活性关系的研究[J]. 园艺学报, 2009, 36(9): 1370-1374.
- [32] NI M, TEPPERMAN J M, QUAIL P H. Binding of phytochrome b to its nuclear signalling partner PIF3 is reversibly induced by light [J]. Nature, 1999, 400(6746): 781-784.
- [33] GILIBERTO L, PERROTTA G, PALLARA P, et al. Manipulation of the blue light photoreceptor cryptochrome 2 in tomato affects vegetative development, flowering time, and fruit antioxidant content[J]. Plant Physiology, 2005, 137(1): 199-208.
- [34] MENG X, XING T, WANG X. The role of light in the regulation of anthocyanin accumulation in gerbera hybrida [J]. Plant Growth Regulation, 2004, 44(3): 243-250.
- [35] ENSMINGER P A, SCHÄFER E. Blue and ultraviolet - b light photoreceptors in parsley cells [J]. Photochemistry and Photobiology, 2010, 55(3): 437-447.
- [36] 郑坚强, 叶豪, 司俊玲, 等. 响应面优化萃取宁夏枸杞类胡萝卜素工艺研究[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(7): 197-201.
- [37] 肖亚冬, 宋江峰, 李大婧, 等. 玻璃态贮藏条件下玉米粉类胡萝卜素的稳定性[J]. 江苏农业学报, 2018, 34(2): 432-438.
- [38] 杨海健, 周心智, 张云贵, 等. 光照对血橙果实内外着色调控的影响[J]. 南方农业学报, 2019, 50(9): 2015-2021.
- [39] LEFSRUD M G, KOPSELL D A, SAMS C E. Irradiance from distinct wavelength light-emitting diodes affect secondary metabolites in kale [J]. HortScience, 2008, 43: 2243-2244.

- [40] JOHKAN M, SHOJI K, GOTO F, et al. Blue light-emitting diode light irradiation of seedlings improves seedling quality and growth after transplanting in red leaf lettuce[J]. Hort Science, 2010, 45: 1809-1814.
- [41] ALBA R, CORDONNIER-PRATT M M, PRATT L H. Fruit-localized phytochromes regulate lycopene accumulation independently of ethylene production in tomato[J]. Plant Physiology, 2000, 123(1): 363-370.
- [42] WU M C, HOU C Y, JIANG C M, et al. A novel approach of LED light radiation improves the antioxidant activity of pea seedlings[J]. Food Chemistry, 2007, 101(4): 1753-1758.
- [43] 许莉, 尉辉, 齐连东, 等. 不同光质对叶用莴苣生长和品质的影响[J]. 中国果菜, 2010(4): 19-22.
- [44] 陈晓丽, 郭文忠, 薛绪掌, 等. LED 组合光谱对水培生菜矿物质吸收的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(5): 1394-1397.
- [45] AMOOZGAR A, MOHAMMADI A, SABZALIAN M R. Impact of light-emitting diode irradiation on photosynthesis, phytochemical composition and mineral element content of lettuce cv. Grizzly[J]. Photosynthetica, 2017, 55(1): 85-95.
- [46] KOPSELL D A, SAMS C E. Increases in shoot tissue pigments, glucosinolates, and mineral elements in sprouting broccoli after exposure to short-duration blue light from light emitting diodes[J]. Sci Hortic, 2013, 53(1): 60-133.
- [47] 吴秋菊, 刘延, 舒清态. 云南高原特色农业烟草高光谱参数与多种生理生化指标的关系[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(7): 230-234.

(责任编辑:张震林)